

簡易な室内水理実験による地表流のマニングの粗度係数の計測

片山 一茂, 小野 裕(信大院農)

現在, 間伐促進など森林整備のための路網整備が行われつつある。しかし, 林道は山地森林と比較すると著しく浸透能が低く, 地表流を発生させる大きな要因となっている。したがって, 林道を含めた山地斜面においてマニングの粗度係数を明確化することは, 山地域での雨水の流出や表面侵食などのメカニズムを解明する上で重要である。そこで本研究では, 簡易な $0.2 \times 1.0\text{m}$ の木製水路を作成し, 水路に貼り付けた礫と粗度係数の関係を明らかにすることを目的として水理実験を行った。その結果, 粗度係数は径深を粗度高で割った値が 1.5 を下回る場合と上回る場合で大きな違いが見られ, 1.5 を下回った場合には粗度係数は急激に高くなった。また, 径深を粗度高で割った値と粗度係数の回帰式は危険率 1% で有意であった。

キーワード: マニングの粗度係数, 地表流, 粗度高, 水理実験

I はじめに

近年, 森林整備を目的として, 各地の森林で路網整備が行われている。しかし, 林道は予め転圧が行われているということもあり, 通常の森林土壌と比較すると浸透能は著しく低く, 地表流が発生しやすい。そして, 林道における地表流の集中は, 表面侵食を加速させるだけでなく, 林道から山地斜面へと浸透することによって地下水深を上昇させ, 斜面崩壊の発生要因ともなっている。

しかし, 林道を含めた山地域での粗度係数の推定については林道での実測だけではなく, 実際の礫等を用いた室内水理実験による計測も多くは行われておらず, 主な推定は雨水流法によって逆算する形で行われてきた。実際に粗度係数の実測を行った研究としては, 北原ほか(3)があり, 国外にて粗度係数は道路(未舗装)で 0.01 という結果を得ており, さらに片山ほか(2)では信州大学附属手良沢山演習林において, 林道および土場(地被なし)における計測で粗度係数は 0.041 という結果を得ている。ただし, (3)は計測地が国外であり, (2)は地表面の状態が一樣ではない。また, (2)では実験斜面の浸透能が大きく, 実験流量が少なくなり斜面上の礫の影響を強く受け, (3)と比較すると粗度係数は大幅に大きい結果となった。したがって, 林道を含めた山地斜面での粗度係数の計測, および推定法は十分とは言えず, 汎用的な結果は得られていない。

そこで, 本研究では山地域での粗度係数を推定するための基礎的段階として, 林道上での粗度係数を推定するため, 各種の礫等を貼り付けた水路を用いて水理実験を行い, 礫径および礫の材質と粗度係数の関係を明らかにすることを目的とする。

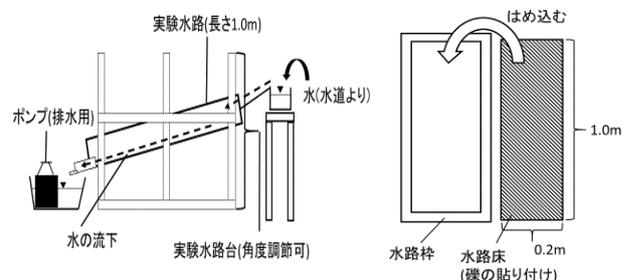
II 実験および算出方法

1. 実験方法

実験は図—1 に示すように, 上流側より一定量の水を供給し, 上流側と下流側の 2 ヶ所で流量を測定するもので

あり, 計測は一定時間水を流下させ, 水路床の余分な礫が流下し, 定常流になった後に行った。なお, 水路枠はコンクリート型枠パネルを加工したものであり, 水路床は図—2 に示すように, 水路枠と同様にコンクリート型枠パネルを用い, そこに木工用ボンドを用いて礫等を貼り付けたものを使用した。水路長 L は 1.0m で水路幅 W は 0.2m である。流速は水路内の水路中心付近に 0.4m 区間を設け, 水路の中心付近を流れる地表流にインクを滴下して通過する時間を計測し, 算出した。また, ポイントゲージを用いて, 実験中の水深 $h(\text{cm})$ および実験後の水路床と水路に貼り付けた礫との高さである粗度高 $d(\text{cm})$ の計測を行った。

実験では, 水路の傾斜を $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ の 4 段階に変化させ, 流量は約 $25(\text{ml/s}), 50(\text{ml/s}), 100(\text{ml/s}), 150(\text{ml/s}), 200(\text{ml/s})$ の 5 段階に変化させた。また, 水路床については, 以下の表—1 に示すように, 各ふるいのサイズごとにそれぞれ表の試料を用いて貼り付けた。ここで, マサ土のみ信州大学附属手良沢山演習林より実際に採取したものを用い, 残りの試料についてはホームセンターで購入したものを用いた。なお, 実験は 4 段階の傾斜, 5 段階の流量, 表—1 の試料を組み合わせると合計で 232 回行った。



図—1 実験水路側面図

図—2 実験水路床図

KATAYAMA Kazushige, ONO Hiroshi, Fac Of Agri, Shinshu Univ.
15aa202k@shinshu-u.ac.jp

Manning's of roughness measured on the overland flow by the simple indoor hydraulic experiment

表—1 ふるいのサイズと実験試料

ふるいのサイズ(mm)	実験試料(実験番号)
	板(表, 粗度なし)①
	板(裏, 粗度なし)②
0.25~0.425	焼砂③
0.425~0.85	マサ土④
0.85~2.00	マサ土⑤
2.00~3.35	マサ土⑥, 富士砂⑦, 軽石⑧
3.35~4.75	軽石⑨
4.75~6.70	砕石⑩
6.70~9.50	砕石⑪
9.50~13.20	砕石⑫

2. 算出方法

粗度係数 n の算出はマンシングの平均流速公式から $n=R^{2/3}i^{1/2}/v \cdot \cdot (1)$

を用いた。ここで、 n は粗度係数、 $R(m)$ は径深、 i は傾斜、 $v(m/s)$ は流速である。ただし、 R は水深が水路幅 W と比較して著しく小さいため、 W と流量 $v(cm/s)$ を用いて

$$R=q/(W \times v) \cdot \cdot (2)$$

と近似した。なお、ここで W については実験に際して、写真—1 に示すように、水路板の両端には漏水防止用のテープを貼るためののりしろが設けてあり、実験中に水流がのりしろ部分を流下しないようにするための詰め物がしてあるため、 W は 17cm となっている。流量 $q(ml/s)$ については、上流側流量 q_u と下流側流量 q_d を用いて、

$$q=(q_u+q_d)/2 \cdot \cdot (3)$$

とし、流速 v は

$$v=40/t \cdot \cdot (4)$$

で求めた。ここで $t(s)$ はインクの 40cm 区間内流下時間である。また、表—1 の実験番号⑥~⑧と⑨、⑩については、実測水深 $h(mm)$ を、流速を計測した区間と同区間の水路中央において、5cm 間隔で合計 9 ヶ所にて計測し、平均実測水深 $H(mm)$ を以下のように算出した。

$$H=\Sigma h/9 \cdot \cdot (5)$$

次に、粗度高 $d(mm)$ は実験終了後に流速を計測した同区間(40cm)にて 2cm ごとに 21 ヶ所を 2 列、合計で 42 ヶ所計測し、平均粗度高 $D(mm)$ を以下のように求めた。

$$D=\Sigma d/42 \cdot \cdot (6)$$

さらに、平均粗度高 D を用いて粗度高と水深(径深 R) の比 σ を以下のように求めた。

$$\sigma=R/D \cdot \cdot (7)$$

ただし、ポイントゲージが 1mm 単位を目盛りであるため、サイズが 0.85~2.00 ふるい残留分以下については、ふるいの目の大きさの中間値を粗度高 d とした。

また、レイノルズ数 Re は以下のように算出し、

$$Re=4R v/\nu \cdot \cdot (8)$$

ν は水温が 25° 前後であったので、本実験では 0.00897

で統一した。

III 結果と考察

1. 計測結果

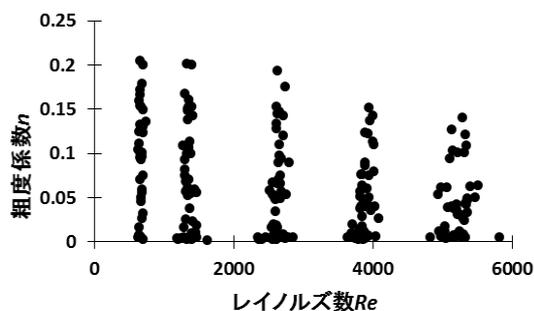
実験番号①と②は 25 (ml/s) での実験を行っていないため 16 回ずつ、③~⑫については 20 回ずつ合計で 232 回実験を行った。表—2 に、各実験での平均粗度係数 N と平均粗度高 $D(mm)$ を示す。なお、ここで表—2 の実験番号は表—1 の実験番号と対応するものとし、II 項で述べたように実験番号③~⑤についてはふるいのサイズの平均値を d とした。

表—2 平均粗度係数 N と平均粗度高 D

実験番号	平均粗度係数 N	平均粗度高 $D(mm)$	計測回数
①	0.00418	0	16
②	0.00498	0	16
③	0.00663	0.338	20
④	0.00751	0.638	20
⑤	0.02042	1.425	20
⑥	0.05544	3.24	20
⑦	0.07387	3.14	20
⑧	0.06559	4.00	20
⑨	0.06468	4.12	20
⑩	0.10241	5.73	20
⑪	0.13009	6.94	20
⑫	0.15301	7.55	20
合計			232

2. レイノルズ数 Re と粗度係数 n

図—3 にレイノルズ Re と n の関係を示す。図より Re と n の間に一定の関係性はないことがわかる。しかし、 Re が大きくなるにつれて n のバラつき、および n は小さくなる傾向が見られる。このような傾向になった理由として、 Re が小さく、流量が少ない状態だと地表流は水路床の粗度の影響を強く受ける。そのため、 n は水路床に貼る試料によって変化すると考えられる。そして、 Re が大きく流量が大きい場合には地表流の水深が大きくなり、結果として地表流が水路床の粗度の影響をあまり受けなくなるため、 n は実験によらず小さくなる傾向になったと考えられる。したがって、 n を決定する要因は流量・流速を反映する Re ではなく、水路床の粗度である礫とそこを流れる水流の水深の関係だと言える。

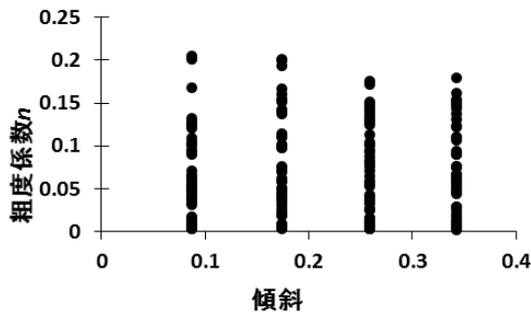


図—3 レイノルズ数 Re と粗度係数 n

3. 傾斜と粗度係数 n

次に、図—4 に傾斜と n の関係を示す。図より、傾斜と

n に一定の関係性は見られず、同じ開水路での室内水理実験を行った岡澤ほか(4)で述べられている n は動水勾配に影響されるとい結果とは異なった。なお、図の x 軸については実際の角度を $\sin\theta$ に代入し、無次元化した値を用いている。そして、このような結果となった理由として、(4)はコンクリート水路を対象とした実験であるため、水路床の粗度は非常に小さく平滑である。しかし、本実験は山地斜面を対象とした実験であるため、実験に用いた粗度は表一2 に示したように平均粗度高で見ても粗度高は0.034~0.76cm の範囲で異なっており、大きな差がある。したがって、本実験では水路床の粗度高が大きく、さらに変化しているため、 n は傾斜によっては影響されず、水路床の粗度に影響を受けて変化していると考えられる。



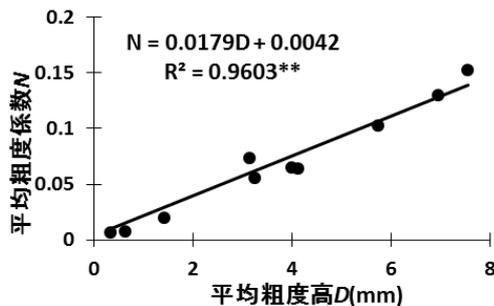
図—4 傾斜と粗度係数 n

4. 平均粗度高 D と平均粗度係数 N

図—5 に各実験での平均粗度高 D と平均粗度係数 N の関係を示し、以下に回帰式として(9)式を示す。なお、ここで回帰式の切片については実験①において粗度を貼り付ける前の板の N が 0.0042 であったので、それを切片として用いた。

$$N = 0.0179D + 0.0042 \quad R^2 = 0.9603 \quad \cdot \cdot (9)$$

(9)式は危険率 1% で有意であり、 D が高くなることで N は大きくなるとわかる。したがって、この結果からも山地斜面、特に林道上などでは n は d によって決定すると考えられる。しかし、図—5 からわかるように今回の実験では、 D の値が 8mm 未満までしか実験を行っていないので、今後はさらに D の値が大きくなる場合での実験を行い D と N の関係を表すことが必要だと考えられる。



図—5 平均粗度高 D と平均粗度係数 N (実験③~⑫)

5. 粗度高と水深の比 σ と粗度係数 n

図—7 に粗度高と水深の比である σ と n の関係を示す。

σ と n の間には一定の関係性が見られ、関係式は以下の(10)式で表された。

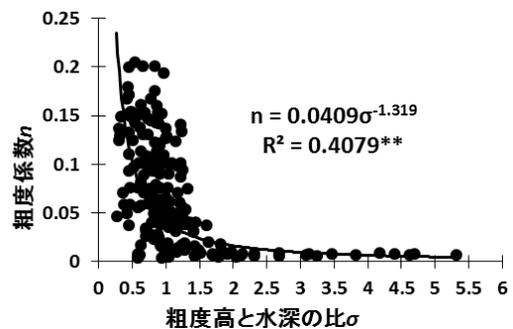
$$n = 0.0409\sigma^{-1.319} \quad R^2 = 0.4079 \quad \cdot \cdot (10)$$

(10)式は危険率 1% で有意であり、 σ が大きくなることで n は 0 に漸近している。また、 σ が 1.5 を下回ることによって n は急激に大きくなっている。したがって、 d が水深を上回ることによって粗度係数は高くなったと考えられ、浅野ほか(1)が山地小河川において n を計測した研究で、 n は水深が河床の礫を下回ると急速に高くなり、その範囲においては、 n は水深に依存するが、水深が河床の礫を上回ると n は水深に依存せずになんか一定になったという結果と類似している。

また、図—6 では σ が 1.5 を下回った時点から n は急激に高くなっており、水深が水路床の d の 50% 程度の高さ分だけ上回った状態でも n は d に依存しているとわかる。このような結果になった理由としては、水深が d と同じか、少し上回る状態では本実験では粗度となる試料を木工用ボンドで接着しているため、実験を行うにつれて試料が一部流出してしまう。その結果、 d に若干のばらつきが発生するため、計算で得られた水深と実際の水路での水深に誤差が生じているからだと考えられる。

しかし、図—6 では σ と n の関係性を示したことで、4 項で得られた結果とは異なり、 d の高さや水深の関係から n を表すことができた。したがって、山地斜面だけではなく山地河川を含めた山地域全体での n の推定には d と n の関係だけではなく、 σ と n の関係に注目する必要があると考えられる。

6. 計算での水深 R と平均実測水深 H



図—6 粗度高と水深の比 σ と粗度係数 n

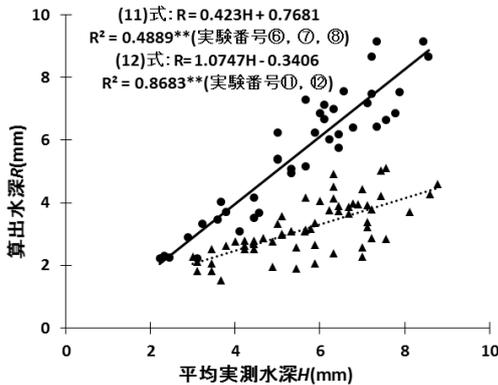
図—8 に(2)式で求めた計算での水深 R と(5)式で求めた平均実測水深 H の関係を示す。なお、 H については研究の途中から取り入れたため、実験番号⑥~⑧と⑪、⑫のみ計測した。また、実験番号⑥~⑧と⑪、⑫では異なる傾向がみられたので、⑥~⑧を(11)式、⑪と⑫を(12)式とすると関係式は以下のように表された。

$$R = 0.423H + 0.07681 \quad R^2 = 0.4889 \quad \cdot \cdot (11)$$

$$R = 1.0747H - 0.03406 \quad R^2 = 0.8683 \quad \cdot \cdot (12)$$

(11)式、(12)式ともに危険率 1% で有意であった。しかし、(11)式の傾きは 0.423 となり、 H が R の 2 倍以上の値をとるのに対し、(12)式では傾きが 1.0747 となり、ほぼ $R=H$ の関係になった。したがって、(12)式の実験番号⑪、⑫つ

いては(2)式で算出された R と実測された H がほぼ等しいため、 n の算出にはどちらを用いても相違はないとわかった。また、(11)式の実験番号⑥、⑦、⑧についてはふるいの目のサイズが2.00~3.35mmと比較的小さく、水路床の粗度高が低くなるため、その結果流速が大きくなり水流の表面に波が生じる。そして、ポイントゲージで計測の際に、この波を水深として捉えてしまっている部分があるため、 R に対して H が2倍以上の高さになったと考えられる。



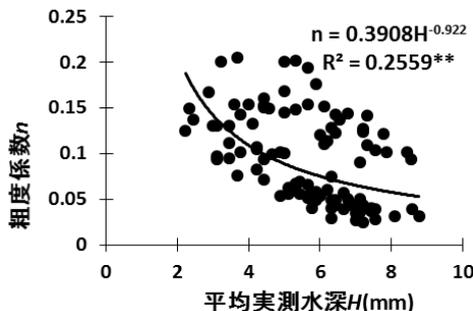
図—8 平均実測水深 H と計算での水深 R

7. 平均実測水深 H と粗度係数 n の関係

図—8に実験⑥~⑧と⑩、⑫で得られた H と n の関係を示す。両者の関係を以下の(13)式で示す。

$$n = 0.3908H^{-0.922} \cdot \cdot (13)$$

(13)式は危険率1%で有意であり、(10)式と同様に累乗式で表され、 H が小さくなると n は大きくなり、 H が大きくなると n は小さくなった。しかし、(10)式と比較するとデータ数自体が少ないということもあるが、バラつきが大きくなり決定係数は低くなった。このような結果になった理由として、(11)式と(12)式において、 d の高さの違いによって H と R の回帰式の傾きに違いが生じたことから、(13)式では直接 H と n を表しているため、この傾きの傾向の違いが影響し、決定係数が低くなったと考えられる。したがって、(1)でも述べられていたように n は H によって影響を受けるが、 n をより正確に推定するには H を直接用いるのではなく、 d に注目する必要があると考えられる。



図—9 平均実測水深 H と粗度係数 n

IV まとめ

n と Re 、傾斜の間には明瞭な関係性はなかった。ただ

し、 Re が大きくなるにしたがって n は小さくなる傾向があった。また、 D と N の関係は危険率1%で有意であり、山地斜面、特に林道において n を決定する要因は d であるとわかった。

次に、 H と R の関係からわかったように d の高さの違いによって H の現れ方の傾向には違いが生じるため、 H と n の関係を直接表すことは難しいとわかった。そこで、 n と σ の関係を用いると n と σ の関係は全実験を通して累乗式で表すことができ、両者の関係は危険率1%で有意であった。そして、 σ の値が1.5を境に、 n は大きく変化した。したがって、地表流の n を決定する重要な要因は水深と d の関係だと言える。よって、 σ と n の関係を用いることで、林道や浸透能が低く地表流の発生しやすい一部の山地斜面において n を推定することが可能だとわかった。

V おわりに

本研究では、 d と n の関係性を明らかにすることができた。しかし、本実験での水路床に貼る試料は、一定の大きさに揃ったものであり、実際の林道等とは状況が異なる。したがって、今後は実際の林道での屋外実験を行うとともに、実験斜面の地表面を構成する粒径組成を調べ、その結果と本研究で得られた結果を検討する必要がある。ただし、本研究では d と n の良好な関係を表せたことから、今後の林道整備、および森林管理の一助となる結果が得られたと言える。

また、本研究での結果を(2)で得られている山地斜面におけるの水力実験の結果と比較検討すること、さらに今後、急傾斜地を想定した実験と地被による n の変化を解明する実験を行うことにより、林道以外の山地斜面においても n を推定することができると考えられる。

VI 謝辞

最後に、信州大学大学院農学研究科治山学研究室の佐々木もも帆さんには、水力実験を行うにあたり多くのご協力をしていただきました。この場を借りて感謝の意を表します。

引用文献

- (1)浅野友子・星野晋一郎・内田太郎・秋山浩一(2012) 山地河道におけるマンシングの粗度係数の実測. 砂防学会誌, vol. 65, No 1, p. 62-68
- (2)片山一茂・北原曜・小野裕(2014) 簡易な水力実験による山地斜面におけるマンシングの粗度係数の計測. 中森研, No.63, p. 133-136
- (3)北原曜・徳川浩一・Rodrigo Vargas・小宮忠義(1996) 表面侵食に及ぼす地被の影響—チリ半乾燥地における事例—. 日林誌 107, p.331-334
- (4)岡澤宏・竹内康・増野途斗・牧恒雄(2008) 軟質FRPライティング工法による開水路の粗度係数. 東京農大農学集報, 53(3), p.194-199